УДК 621.376:621.397.3

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ГРУППЫ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕКРЫТИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.М. Слободян

Инновационный центр «ТЕСТ». г. Томск
E-mail: IC_Test@inbox.ru

Предложен метод обнаружения перекрытия изображений объектов. Проведена оптимизация отношения сигнал/шум при обнаружении группы объектов с перекрытием изображений. На примере группы двух объектов с пространственно-временным перекрытием изображений дана оценка изменения фазы сигнала и количественная оценка выигрыша по вероятности обнаружения объектов предложенным методом.

Проблема обнаружения объектов с перекрывающимися изображениями и спектрами как классических, так и фрактальных сигналов представляет значительный интерес [1–3] и является актуальной до настоящего времени. В [4] рассмотрена и обоснована возможность статистического раздельного обнаружения одного объекта с импульсной модуляцией сигнала на фоне изображений других объектов при пространственном перекрытии их изображений или временном перекрытии импульсных сигналов от близко расположенных оптически раздельно разрешаемых изображений объектов. Для управляемых в реальном времени объектов перекрытия их изображений можно избежать, «разводя» объекты на расстояние, превышающее предельную по критерию Релея разрешающую способность системы наблюдения. Однако на практике наоборот [5–7] требуется обеспечить наибольшую точность управления путем совмещения положения объектов. Это значит, что перекрытие изображений отражает тесную связь целей задач идентификации и управления объектами: при повышении точности и быстродействия управления объектами величина перекрытия их изображений будет увеличиваться, затрудняя [4, 6] условия раздельного управления и индивидуального их распознавания.

Для, часто возникающих на практике, случаев совмещения изображений объектов на основе предложенного в [5] способа, ниже показана возможность значительного увеличения отношения сигнал/шум для подтверждения факта обнаружения i-ого и j-ого объектов с частичным или полным пространственно-временным перекрытием их изображений или сигналов. Количественную оценку эффективности по статистическим показателям (отношение сигнал/шум и вероятности правильного обнаружения) качества работы средств обнаружения объекта из группы близко расположенных на основе предложенного метода обнаружения факта совпадения их положения в пространстве изображения проведем на примере группы из двух близко расположенных объектов, изображения которых перекрываются во времени или пространстве.

Для большинства измерительных и следящих средств поток импульсов от объекта нормализуется и энергетический спектр $G_i(\omega)$ нормированных по амплитуде марковской последовательности одноэлектронных импульсов при слежении за одиночным объектом представляется описанием энергетического спектра импульсного сигнала интенсивностью $\overline{n_u}$ пуассоновского потока фотонов, скважностью импульсов $\theta_{сл}$ с периодом следования T_x от отдельного изображения i-ого объекта, при малой погрешности слежения принимающим вид:

$$G_i(\omega) = \bar{n}_u \theta_{сл} \begin{bmatrix} 1 + N_\tau \dfrac{2\pi}{T_x} \sum\limits_{s=-\infty}^{\infty} \sin^2(s_i\pi/\theta_{сл}) \times \\ \times \delta(\omega - \dfrac{2s_i\pi}{T_x})/(s_i\pi/\theta_{сл})^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где N_τ – среднее число одноэлектронных импульсов в пачке импульсов видеосигнала на интервале T_x; s_i – номер гармоники сигнала.

Спектр суммарного сигнала при воздействии потока излучения от группы κ близко расположенных объектов с пространственно-временным перекрытием сигналов будет равен сумме энергетических спектров сигналов его составляющих [4, 5]:

$$G_\Sigma(\omega) = \sum_{i=1}^{\kappa} G_i(\omega), \quad (2)$$

где i=1,2,...,κ – число объектов, изображения и сигналы от которых перекрываются.

Энергетический спектр импульсной последовательности каждого из сигналов представим в виде суммы непрерывной и импульсной составляющих спектра

$$G_i(\omega) = A(\omega) + \omega_0 \sum_{s=-\infty}^{\infty} B_s \delta(\omega - s\omega_0),$$

где $A(\omega)$ – непрерывная часть спектра (шум); B_s – мощность s-й гармоники сигнала основной частоты следования импульсов $\omega_0=2\pi/T_x$. Для объектов слабой освещенности с пространственно-временным перекрытием сигналов будем считать, что марковские свойства потока фотонов от каждого из объектов в суммарном потоке сохраняются, и пуассоновская статистика импульсов на выходе фотоприемника системы не нарушается. Энергетический спектр (2) суммарного сигнала от $к$ близко расположенных объектов, с учетом разложения (1) на непрерывную $\mathrm{A}(\omega)$ и дискретную $B_S\delta(\omega)$ части, примет вид:

$$G_\Sigma(\omega) = \sum_{i=1}^{к} A_i(\omega) + \omega_{oc} \sum_{i=1}^{к} \sum_{s=-\infty}^{\infty} B_{si} \delta(\omega - s_i \omega_{oi}), \quad (3)$$

где $\omega_{oi}=2\pi/T_{xi}$ – частота первой гармоники сигнала от i-ого объекта; ω_{oc} – резонансная частота фильтра для выделения видеосигнала и s_i – номер гармоники сигнала. Мощность, выделяемая сигналом, в фильтре с комплексным сопротивлением $Z(i\omega)$ составит

$$P_c + P_ш = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) |Z(i\omega)|^2 \, d\omega, \quad (4)$$

где P_c и $P_ш$ – мощность соответственно сигнальной и шумовой его составляющих. Эти энергетические соотношения однозначно определяют помехоустойчивость и чувствительность средств при обнаружении и слежении за объектами.

Оценку качества работы этих средств по группе близко расположенных объектов с импульсно-модулированным излучением сведем к вычислению отношения сигнал/шум на выходе фильтра, величина которого является параметром, определяющим статистические характеристики сканирующих и измерительных средств обнаружения и контроля объектов.

Используя результаты, изложенные в [5, 6] для вычисления отношения сигнал/шум при приеме импульсно-модулированного сигнала от одиночного объекта, и полагая отношение периодов повторения импульсов принимаемых сигналов от близко расположенных объектов равным $T_i{:}T_j=m_i{:}m_j$ при высокой добротности фильтров $Q_к>>1$, из (4) и (2) получим выражение для отношения сигнал/шум при выделении основной гармоники сигнала от i-ого объекта на фоне j объектов

$$\Psi_i = \frac{2}{\pi} Q_к B_{1i} \Bigg[\sum_{i=1}^{к} A_i(\omega_{oci}) + \sum_{i=1}^{к} m_i B_{si} / m_j [1 + 4Q_к^2 (\frac{m_i}{m_j} - 1)^2] \Bigg]^{-1}. \quad (5)$$

Для регистрации факта перекрытия изображений группы близко расположенных объектов можно использовать [4, 5] эффект совпадения гармоник импульсных сигналов от объектов с пространственно-временным перекрытием изображений. Тогда для системы с фильтром, настроенным на частоту $\omega_{осг}$ – совпадающих гармоник сигналов от близко расположенных объектов, получим отношение сигнал/шум, равное

$$\Psi_{CГ} = \frac{2}{\pi} Q_к \sum_{i=1}^{к} B_{si} / \sum_{i=1}^{к} A_i(\omega_{осг}). \quad (6)$$

В (6) суммирование идет по тем объектам, сигналы и ИО которых перекрываются, и тем s_i – которые лежат в полосе пропускания фильтра. Выражения (5) и (6) позволяют оценить влияние временного и пространственного перекрытия изображений и сигналов от раздельно не разрешаемых близко расположенных объектов как для решения задачи индивидуального распознавания одного объекта на фоне других, так и при их совместном обнаружении.

Энергетический спектр сигнала каждого из объектов с перекрытием изображений при средней амплитуде флуктуирующих в интервале 0–1 импульсов равной 0,5 и ее дисперсии – 0,25 (сильные флуктуации амплитуды или интенсивности потока) определится выражением, полученным с учетом (1–3):

$$G^{\Phi}(\omega) = \frac{\bar{n}_{ui} \theta_{cкi} Q_к^2}{2} \times$$
$$\times \left[1 + \bar{n}_{ui} \sin c^2 \left(\frac{\omega \tau_{ui}}{2} \right) + \frac{\pi}{T_{xi}} \bar{n}_{ui} \times \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sin c^2 \left(\frac{\pi s_i}{\theta_{cкi}} \right) \delta(\omega - s_i \frac{2\pi}{T_{xi}}) \right], \quad (7)$$

где $\sin c(x)=(\sin x)/x$; индекс "Ф" – соответствует флуктуирующим по амплитуде импульсам; "О" – при весьма малой дисперсии $\sigma^2 \to 0$ флуктуаций сигнала. Обозначения здесь аналогичны выражениям (1–3).

Флуктуации суммарного сигнала на совпадающих гармониках объясняются тем, что при управлении объектами выявляются характерные для них отличительные проявления реакций на управляющие воздействия. Так, при приведении объектов к аутентичному положению в пространстве, их поведение в части проявления собственных свойств в навязанном им переходном процессе для перемещения по одной и той же траектории с минимальными погрешностями отклонения будет отличаться. Независимо действующие друг от друга, возмущения в канале наблюдения и специальные сигналы управления, подаваемые на объект, во время переходного процесса раскачивают положение каждого из управляемых объектов, обуславливая их случайные независимые перемещения, вызывающие изменение расстояния их межцентрового разноса в пространстве изображения. Это приводит к флуктуациям сигналов от каждого из объектов и к вариациям величины перекрытия их изображений, определяющих уровень их взаимного влияния, затрудняющего индивидуаль-

ное распознавание каждого из них на фоне других и ограничивающего предельно достижимую точность управления этими объектами.

Для оценки эффективности рассматриваемых методов обнаружения, примем сигналы от объектов равной интенсивности $n_{иi}=n_и$ и $\theta_{ск}$ скважности: $T_1{:}T_2=m_1{:}m_2$; $\bar{n}_{и2}=n_и m_2/m_1$. Тогда для объектов с перекрытием изображений отношение сигнал/шум на выходе фильтра настроенного на частоту совпадающих гармоник сигналов найдется из выражений:

$$\Psi_2^0=\frac{Q_к\bar{n}_и}{\pi}\left[\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_1}{\theta_{ск}}\right)+\frac{m_2}{m_1}\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_2}{\theta_{ск}}\right)\right]; \quad (8)$$

$$\Psi_2^Ф=\frac{2Q_к\bar{n}_и}{\pi}\left[\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_1}{\theta_{ск}}\right)+\frac{m_2}{m_1}\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_2}{\theta_{ск}}\right)\right]\times$$

$$\times\left[4+\bar{n}_и(\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_1}{\theta_{ск}}\right)+\frac{m_2}{m_1}\sin c^2\left(\frac{\pi\, m_2}{\theta_{ск}}\right))\right]^{-1}. \quad (9)$$

Аналогично [4], при раздельном выделении по основной гармонике сигнала одного объекта на фоне других объектов отношение сигнал/шум описывается выражениями:

$$\Psi_1^0=\frac{Q_к\bar{n}_и}{\pi}\sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\times$$

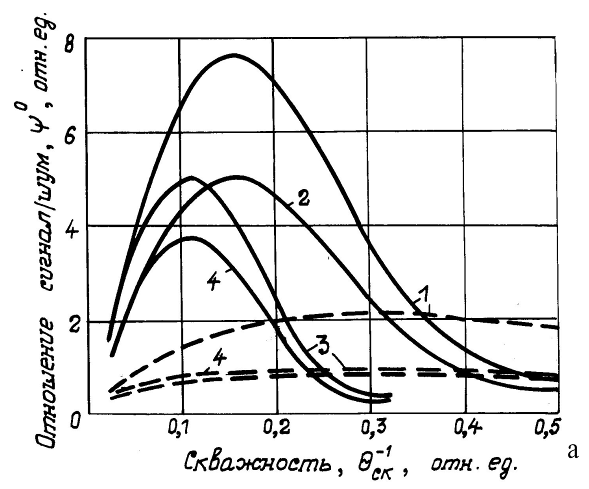
$$\times\left(1+\frac{\theta_{ск}\bar{n}_и}{\pi}\cdot\frac{m_2}{m_1}\times \sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\left[1+4Q_к^2\left(\frac{m_1}{m_2}-1\right)^2\right]^{-1}\right)^{-1}; \quad (10)$$

$$\Psi_1^Ф=\frac{2Q_к\bar{n}_и}{\pi}\sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\times$$

$$\times[4+\bar{n}_и\sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)+\bar{n}_и\,\frac{m_2}{m_1}\sin c^2\left(\frac{\pi m_1}{m_2\theta_{ск}}\right)+$$

$$+\frac{2Q_к\bar{n}_и}{\pi}\sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\left[1+4Q_к^2\left(\frac{m_1}{m_2}-1\right)\right]^{-1}]^{-1}. \quad (11)$$

На рис. 1, *а*, *б*, приведены зависимости отношения сигнал/шум, полученные по выражениям (5, 9) и (10, 11), от величины обратной скважности. Пунктирные кривые соответствуют формулам (10 и 11) – раздельному выделению сигналов; сплошные – получены по формулам (8 и 9) и соответствуют выделению суммарного сигнала от обоих объектов на частоте совпадающих гармоник как кооперативного объекта. Из рисунков видно, что при регистрации сигналов с перекрывающимися спектрами от близко расположенных объектов отношение сигнал/шум на выходе фильтра, настроенного на совпадающие гармоники сигналов от объектов с перекрытием изображений, при определенной величине скважности сигналов превышает отношение сигнал/шум на выходе фильтра, настроенного на основные гармоники сигналов каждого из объектов с перекрытыми изображениями. Так же видно, что выигрыш принципа регистрации близко расположенных объектов по частоте совпадающих гармоник сигналов возрастает со снижением флуктуаций их амплитуды, непосредственным образом связанными с динамикой вариаций величины перекрытия их изображений, определяемыми динамикой поведения траектории движения объектов и степени турбулентного хаоса в канале их наблюдения.



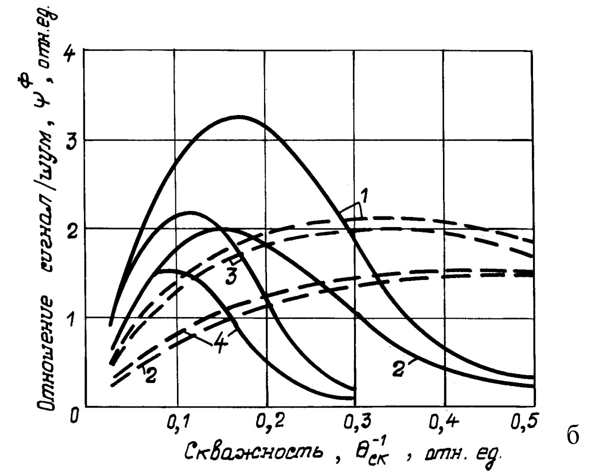


Рис. 1. *Зависимость отношения сигнал/шум от скважности импульсов для случая слабых (а) и сильных (б) флуктуаций: 1) (m_1/m_2=3/2); 2) (2/3); 3) (4/3); 4) (3/4)*

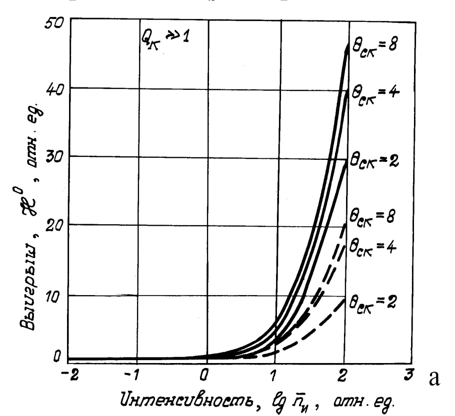
Оценим эффективность метода обнаружения объекта, исследуя поведение энергетического выигрыша в зависимости от параметров, входящих в это выражение. Величину энергетического выигрыша при приеме сигнала от одиночного объекта (при отсутствии перекрытия изображений наблюдаемых объектов) по сравнению с приемом сигнала от этого же объекта на фоне изображения другого объекта. Для фильтра, настроенного на основную частоту модуляции $\omega_{01}=2\pi/T_1$ (при $Q_к$>>1), из [4], с учетом (2) и (3) получим:

$$\chi_1^{\Phi}=\left[4+\bar{n}_u \sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\Big/\left[\begin{array}{c}1+\frac{2Q\kappa}{\pi}\times\\ \times\left[1+4Q_\kappa^2(\frac{m_1}{m_2}-1)^2\right]^{-1}\end{array}\right]+\right.$$

$$\left.+\bar{n}_u\frac{m_2}{m_1}\sin c^2\left(\frac{\pi m_1}{m_2\theta_{ск}}\right)\right]\left[2+\bar{n}_u \sin c^2\left(\frac{\pi}{\theta_{ск}}\right)\right]^{-1}; \quad (12)$$

$$\chi_1^0=2\left[\begin{array}{c}1+\frac{Q_\kappa\bar{n}_u}{\pi}\cdot\frac{m_2}{m_1}\cdot\sin c^2\left(\frac{\pi_1}{\theta_{ск}}\right)\times\\ \times\left[1+4Q_\kappa^2(\frac{m_1}{m_2}-1)^2\right]^{-1}\end{array}\right]. \quad (13)$$

Численные расчеты зависимости (12 и 13) в функции логарифма среднего числа сигнальных электронов для Q_κ>>1 представлены на рис. 2, *а*, *б*.



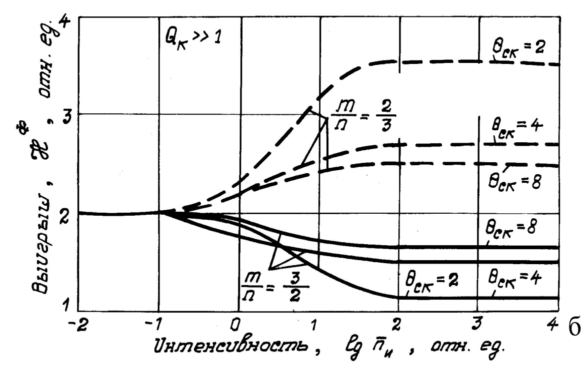


Рис. 2. *Энергетический выигрыш при приеме сигнала от одиночного объекта по сравнению с приемом этого же сигнала на фоне сигнала второго объекта от среднего числа фотоэлектронов в импульсе для m_1/m_2=m/n=3:2 и 2:3. Случай (а) – слабых флуктуаций (пунктир – m/n=3:2; сплошные – m/n=2:3) и (б) – сильных флуктуаций*

Из анализа полученных данных следует, что при раздельном выделении сигналов от объектов (на основной частоте) достаточно слабой интенсивности отношение сигнал/шум уменьшается в два раза (примерно в κ раз) по сравнению со случаем приема сигнала от одиночного объекта как при сильных, так и при весьма слабых флуктуациях интенсивности потока фотоэлектронов. С увеличением интенсивности потока фотоэлектронов от объектов величина проигрыша при сильных флуктуациях сигналов лежит в пределах от 1,2 до 3,5 в зависимости от набора значений $\theta_{ск}$ и m_1/m_2, в то время как при весьма малых флуктуациях интенсивности потока импульсов происходит резкое снижение величины выигрыша идентификации одного объекта на фоне изображения другого.

Исследуем другой случай. Оценим выигрыш фильтрации сигнала от близко расположенных объектов на частоте совпадающих гармоник по сравнению со случаем раздельного выделения сигналов от каждого из объектов. Величину энергетического выигрыша по величине отношения сигнал/шум получим из соотношения выражений (8, 10) и (9, 11) (при Q_κ>>1):

$$\chi_{21}^0=\frac{1}{m_2^2}\frac{\sin^2\frac{\pi m_2}{\theta_{CK}}}{\sin^2\frac{\pi}{\theta_{CK}}}+\frac{m_2}{m_1^3}\frac{\sin^2\frac{\pi m_1}{\theta_{CK}}}{\sin^2\frac{\pi}{\theta_{CK}}}; \quad (14)$$

$$\chi_{21}^{\Phi}=\frac{\sin^2\frac{\pi m_1}{\theta_{CK}}+\frac{m_2}{m_1}\sin^2\frac{\pi m_2}{\theta_{CK}}}{\sin^2\frac{\pi}{\theta_{CK}}}\times$$

$$\times\frac{\frac{4}{\bar{n}_u}+\sin^2\frac{\pi}{\theta_{CK}}+\frac{m_2}{m_1}\sin^2\frac{\pi m_1}{m_2\theta_{CK}}}{\frac{4}{\bar{n}_u}+\sin^2\frac{\pi m_1}{\theta_{CK}}+\frac{m_2}{m_1}\sin^2\frac{\pi m_2}{\theta_{CK}}}. \quad (15)$$

Численный расчет (15) в зависимости от интенсивности потока фотоэлектронов сигнала приведен на рис. 3 для некоторого набора параметров. Согласно (14) для m_1:m_2=2:3 выигрыш составляет: 1,93($Q_{ск}$=8); 0,87 ($\theta_{ск}$=4) и 0,11 ($\theta_{ск}$=2). Для m_1:m_2=3:2; соответственно 1,3; 0,58 и 0,07. Анализ выражения (15) показывает, что при фильтрации сигналов на частоте, кратной совпадающим гармоникам каждого из близко расположенных объектов, характерно возрастание выигрыша с увеличением интенсивности потока фотоэлектронов в сигнале и скважности импульсов. Рост эффективности этого метода обусловлен тем, что с увеличением скважности импульсов расширяется спектр принимаемых сигналов и возрастают амплитуды других гармоник сигнала. В случае выделения слабофлуктуирующих сигналов от близко расположенных объектов [выражение (14)] величина выигрыша определяется только соотношением частот модуляции сигналов от объектов, номера кратных гармоник, шириной спектра и не зависит от интенсивности потока фотоэлектронов в них. Кроме того, численный анализ (14 и 15) показал, что каждое соотношение частот сигналов от объектов m_1:m_2 имеет оптимальное значение скважности, при котором выигрыш для данной добротности фильтра максимален. Так, например: при Q_κ=10, $\bar{n}_u$=10, m_1:m_2= 2:3 – $Q_{опт}$=5 (χ_{21}^{Φ}=4,86); но для m_1:m_2= 3:2 – $Q_{опт}$=8 (χ_{21}^{Φ}=3). Оптимальный размер следящего сканирования при работе по группе объектов

может быть найден по методике, изложенной в [6]. Его значение будет отличаться от значения полученного при условии оптимальности соответствия случаю одиночного объекта. Для фильтра с высокой добротностью ($Q_к$>>1) и при $A(\omega)=A(\omega_0)$=const, из условия максимизации отношения сигнал/шум

$$(P_c/P_ш)=\frac{2Q_к}{\pi^3}\frac{T_{сл}}{n_x\tau_{ср}}\theta_{сл}\sin^2(\pi/\theta_{сл})|_{\max}$$

оптимальный размер n_x – ходового растра слежения за одиночным объектом с модулированным излучением и марковской статистикой потока одноэлектронных импульсов на выходе фотоприемника системы составит: $\ell_{сл}$~2,7 d_a.

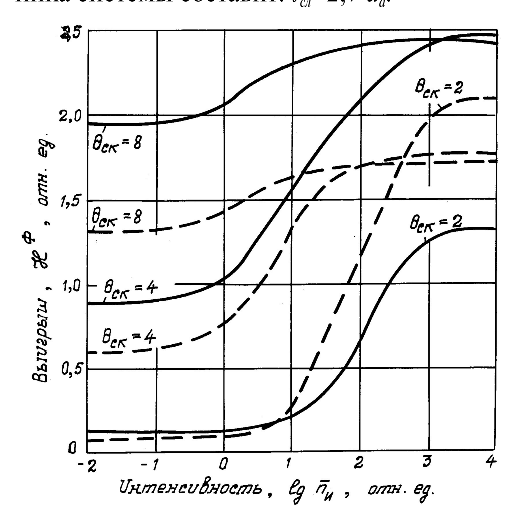


Рис. 3. *Выигрыш способа выделения сигналов на частоте совпадающих гармоник по сравнению с раздельной регистрацией на основной частоте модуляции сигналов от объектов: m_1/m_2=3/2 (----); m_1/m_2=2:3 (—). Случай сильных флуктуаций*

То есть, выбором определенных соотношений параметров сигналов от объектов с пространственно-временным перекрытием изображений метод выделения сигнала от близко расположенных объектов на частоте совпадающих гармоник, как факта подтверждения обнаружения данных объектов при перекрытии их изображений, позволяет обеспечить в следящих средствах лучшие или равные условия обнаружения, слежения и управления объектами по сравнению со случаем одиночного объекта в пространстве наблюдения.

Вероятность раздельного [4] и совместного кооперированного обнаружения близко расположенных объектов будет являться функцией принимаемого потока энергии от них и степени пространственной и временной корреляции их сигналов. При минимальном коэффициенте взаимной корреляции их сигналов, малых значениях оптического контраста и отношения сигнал/шум выражение для определения выигрыша по вероятности кооперативного обнаружения (по совпадающим гармоникам сигналов) по сравнению с раздельным распознаванием сигналов от каждого из объектов может быть найдено аналогично [4] и в первом приближении приведено к виду

$$\frac{1-H_{12}}{1-H_i}\cong\frac{2+\Psi_{12}}{2+\Psi_i},$$

где H_{12} и H_i – вероятность ошибки совместного и раздельного обнаружения на фоне i-ого изображения объекта; Ψ_{12} и Ψ_i – отношение сигнал/шум по методу выделения совпадающих и основной гармоники для тех же объектов.

В реальных на практике случаях, фазы, принимаемых от объектов, сигналов не только неизвестны, но являются случайными функциями пространства и времени. Это накладывает определенный отпечаток на закономерности изменения амплитуды и фазы сигналов от объектов с перекрывающимися изображениями на временной или пространственных осях. Для корректного распознавания весьма полезно определение фаз реальных сигналов и их временных и пространственных вариаций. Однако, задача точного определения фаз и фазовых соотношений сигналов от близко расположенных объектов с перекрытием изображений весьма сложна и ее решение затруднено, особенно в случае перекрытия изображений и сигналов более чем двух объектов. Весомым доказательством невозможности определения фаз сигналов от объектов с перекрывающимися в пространстве изображениями является то, что, для любого из принимаемых сигналов от объектов на фоне изображения других близко расположенных, практически невозможно найти такие интервалы времени, при которых остальные сигналы от других объектов из кооперативной группы были бы равны нулю на том же временном интервале распознавания сигнала этого объекта на фоне других близко расположенных.

Оценку особенностей взаимодействия фаз сигналов от близко расположенных объектов с перекрытием изображений рассмотрим на примере аддитивного сложения смеси основных первых гармоник сигналов от двух объектов с перекрывающимися изображениями

$$x_{12}(t)=A_1\cos(\omega_1 t+\varphi_1)+A_2\cos(\omega_2 t+\varphi_2)$$

с амплитудами A_1 и A_2, частотой их модуляцией ω_1 и ω_2, определяющих частоты основных первых гармоник, сигналов и фазами φ_1 и φ_2 независимыми и равномерно распределенными на интервале $(0,2\pi)$. В принципе сумму импульсно-модулированных сигналов в первом фазовом приближении можно представить в виде

$$x_{12}(t)=A_{12}(t)\cos[\omega t+\Delta\omega\int_0^t k(t)dt],$$

где $A_{12}(t)=A_1(1+k^2+2k\cos\Delta\omega t)^{1/2}$ – огибающая суммарного сигнала; ω и $\omega+\Delta\omega$ – круговая частота первого и второго сигнала аддитивной смеси при $\Delta\omega=\omega_{1,2}-\omega_{2,1}$; $k=A_2/A_1$ – отношение амплитуд сигналов аддитивной смеси; $\omega(t)=\Delta\omega k(t)$ – мгновенная частота сигнала $x_{12}(t)$. Функция $(1+k^2+2k\cos\Delta\omega t)$, преобразованная как произведение двучленов с последующим ее разложением по формуле бинома

Ньютона в ряд с учетом дробной степени может быть представлена в виде суммы трех с наибольшим весом членов разложения и закономерность изменения огибающей суммарного сигнала примет вид

$$A_{12}(t) = A_1(1 + k^2/4 + k^4/64)^{1/2}.$$

Изменение фазы аддитивной смеси основных гармоник сигналов при перекрытии изображений в рассматриваемом случае определится выражением

$$\varphi(t) = \mathrm{arctg}[k \sin \Delta\omega t/(1 + k\cos\Delta\omega t)]. \quad (16)$$

Анализируя уравнение огибающей суммарного сигнала на предмет пересечения им уровня, равного уровню амплитуды наименьшего из колебаний его составляющих, получим

$$\cos\Delta\omega t = -k/2.$$

Легко видеть, что при k=0 (случай единственности колебания A_1) на интервале $0<\Delta\omega t<2\pi$ имеет место одна точка π смены знака на интервале изменения данной функции, кроме крайних точек интервала $(0, 2\pi)$. При равенстве амплитуд суммируемых сигналов A_1=A_2 или k=1, кроме средней точки π смены знака числителя имеется две дополнительные точки $\pm 2\pi/3$ возможной смены знака. В зависимости от выбора уровня оси пересечения данной функции, при изменении соотношения амплитуд в диапазоне (0,1) суммируемых сигналов, фаза суммарного сигнала на интервале $(0, \pi)$ дважды меняет свои знаки. Простейшее тригонометрическое тождество, получаемое из (16) при k=1,

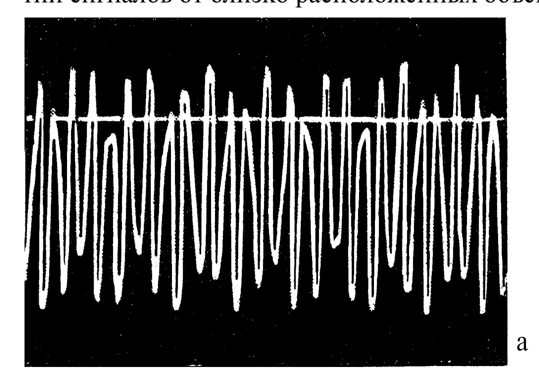
$$\mathrm{tg}\varphi(t) = [\sin\Delta\omega t/(1 + \cos\Delta\omega t)] \equiv \mathrm{tg}(\Delta\omega t/2)$$

подтверждает вывод о том, что фаза суммарного сигнала изменяется по закону тангенса половинного аргумента, определяемого разносом частот аддитивно складываемых сигналов при перекрытии изображений их источников. Закономерность изменения огибающей при сложении реальных сигналов с соотношением частот m_1:m_2=2,93478:1 наглядно иллюстрирует осциллограмма (рис. 4).

Используя теорию выбросов траектории стационарных случайных процессов, можно показать [9], что закономерность изменения среднего числа пересечений $N_x(0,1)$ нулевого уровня – временной оси сигналом x_{12} при $\omega_1=2\pi f_1>\omega_2=2\pi f_2$ и $A_1<A_2<A_1\omega_1<\omega_2$ будет описываться выражением

$$N_x(0,1) = \frac{4f_2}{\pi}\left[\begin{array}{l}\dfrac{f_1}{f_2}\arccos\sqrt{\dfrac{(1-A_1^2/A_2^2)}{(1-f_2^2/f_1^2)}} + \\ + \arcsin\sqrt{\dfrac{[(A_2/A_1)^2-1]}{[(f_1/f_2)^2-1]}}\end{array}\right] \quad (17)$$

с изменением функций arccos x и arcsin x на интервале значений аргумента $(0, \pi/2)$. В предельных случаях: когда $A_1>A_2$ и $A_1\omega_1>A_2\omega_2$ число пересечений нулевого уровня суммарным сигналом равно $2f_1$; при $A_1<A_2$ и $A_1\omega_1<A_2\omega_2$ оно составит величину равную $2f_2$; с учетом соотношения arcsin x=0,5π–arccos x для (f_1/f_2)arccos M_1=arccos M_2 (где M_1 и M_2 – подкоренные выражения в (17)) получим для этой точки число пересечений нулевого уровня суммарным сигналом равное $2f_2$; для точки M_1=M_2=M оно составит $2f_2-[(f_2-f_1)/\pi]$arccos M. То есть, при изменении соотношения амплитуд суммируемых сигналов среднее число пересечений сигналом $x_{12}(t)$ временной оси монотонно изменяется в интервале значений $[2f_1;2f_2]$; при приближении соотношения амплитуд суммируемых сигналов к единичному значению число пересечений нулевого уровня возрастет до максимального значения, определяемого удвоенным значением наибольшей частоты модуляции аддитивно складываемых сигналов: $N_x(0,1)$=max$(2f_1,2f_2)$. Изменение среднего числа нулевых пересечений суммарным сигналам $x_{12}(t)$ отражает характерные изменения смены знака фазы суммарного сигнала при пространственном перекрытии изображений или временном перекрытии сигналов от близко расположенных объектов.



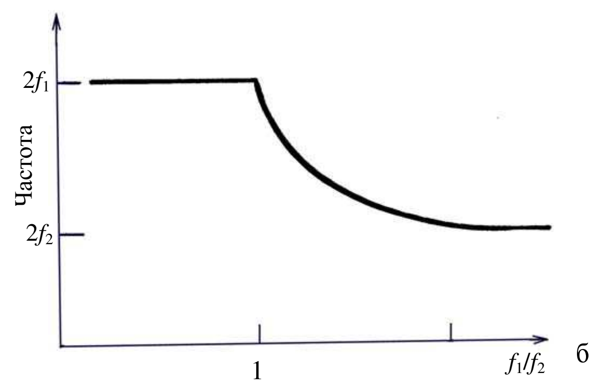


Рис. 4. *Характерные изменения фазы (а) – осциллограмма и среднего числа пересечений (б) аддитивной смеси двух основных гармоник суммарного сигнала*

Таким образом, количественное значение выигрыша в вероятности совместного обнаружения объектов с перекрытием их изображений по сравнению с распознаванием одного из близко расположенных объектов на фоне другого и раздельном различении их сигналов может быть определено для конкретных значений параметров сигналов с учетом вышеизложенного. В режиме обнаружения и слежения за группой объектов на эффективность различных методов выделения и обработки сигналов от объектов, в том числе, по текстурным признакам и вейвлет-анализу [2, 3], на быстродействие решаемой задачи оказывает влияние большой ряд

других факторов [1, 4]: статистика флуктуаций оптического сигнала, алгоритм следящего сканирования, способ формирования сигнала ошибки слежения, соотношение размеров элемента и изображений объектов, динамика их движения, степень астатизма и добротности сканирующего средства, точность слежения и т.п. Вышеизложенную (для a>1) оценку влияния временного и пространственного перекрытия изображений близко расположенных объектов на качество работы систем можно использовать и для случая видеосигнала от объектов в виде пачки импульсов с огибающей, форма которой определяется законами распределения интенсивности потока в изображении, типами пространственных апертурных характеристик (распределения прозрачности, чувствительности и т.п.) элемента фотоприемника и оптики средства наблюдения.

Влияние фактора нестационарного шумового воздействия на характеристики сканирующего средства в режимах обнаружения и слежения за группой контрастных объектов, например, [7], при проводке транспортных средств с многоточечным лазерным створом, может быть также исследовано с использованием вышеизложенного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверин Л.Н., Светлов Т.С. Определение координат группы светящихся точечных объектов // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – № 1. – С. 3–6.
2. Потапов А.В. Фракталы в дистанционном зондировании // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 6. – С. 3–65.
3. Карпенко В.И., Даник Ю.Г., Маляров М.В. Обнаружение объектов во фрактальных структурах // Радиотехника. – 2002. – № 1. – С. 9–12.
4. Слободян С.М. Оптимизация обнаружения сканирующим средством объектов с перекрытием изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 59–63.
5. Слободян С.М. Оценка эффективности приема оптических сигналов от близко расположенных источников // VI Всес. семинар по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации: Тез. докл. – М.: Институт проблем управления АН СССР, 1978. – С. 87–89.
6. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
7. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
8. Гоноровский И.С. Частотная модуляция. – М.: Связьиздат, 1948. – С. 33.
9. Случайные процессы. Выборочные функции и пересечения: Сб. статей / Под ред. Ю.К. Беляева. – М.: Мир, 1978. – 328 с.

УДК 539.21